

PNUTÍ V TEPELNĚ NAMÁHANÝCH ODLITCÍCH Z LITINY

J. HAMPL¹, P. KOZELSKÝ²

ANOTACE: V příspěvku je poukázáno na význam materiálových charakteristik odlitků z grafitických litin, které významně ovlivňují jejich vlastnosti. Vlastnosti litin jsou v rozhodující míře závislé na jejich mikrostruktuře po odlití, případně po tepelném zpracování.

Mikrostruktura odlitku a tedy i jeho vlastnosti mohou být v různých částech, v závislosti na podmínkách tuhnutí, někdy i výrazně odlišné. Na příkladu je poukázáno na vliv metalurgického zpracování taveniny, technologie výroby i konstrukce na výsledné vlastnosti litinových odlitků.

ANOTATION: The contribution points out the import of material characteristics of castings from graphitic cast irons that considerably influence their properties. Cast iron properties are dependent in a decisive degree on their microstructure after casting or after thermal treatment. Casting microstructure, and consequently its properties too, can be sometimes even considerably different in dependence on cooling conditions. Examples show the influence of metallurgical treatment of the melt, of manufacturing technology and design on resulting properties of iron castings.

KEY WORDS: temperature expansivity, iron

ÚVOD.

Pnutí v tepelně namáhaných odlitcích je závislé na teplotním zatížení a materiálových vlastnostech litiny. Mechanické i fyzikální vlastnosti litinových odlitků jsou, při daném chemickém složení dále ovlivněny svou mikrostrukturou i konstrukcí.

Mez pevnosti (R_m), průtažnosti (R_e), modul pružnosti (E), teplotní součinitel délkové roztažnosti (α) i tepelná vodivost (λ) litin jsou dány tvarem, množstvím i způsobem vyloučení grafitu a taktéž charakterem základní kovové hmoty. Materiálové charakteristiky nejsou rovnoměrné v celém průřezu odlitku, závisí na tloušťce stěny a zejména mez pevnosti v tahu i modul pružnosti jsou rozdílné i mezi jeho jednotlivými částmi (moduly). Odlitky u kterých se vyskytují nežádoucí formy grafitu typu I D, E (mezidendriticky neusměrněné a usměrněné) mohou mít odlišné vlastnosti než ostatní části odlitku s pravidelně vyloučenými typy grafitu I A. U odlitků, které jsou v provozu namáhány tepelnou únavou spojenou s dilatačními změnami rozměrů součástí jako jsou kotlové články a brzdové kotouče [1,2], je důležité znát zejména hodnoty teplotního součinitele délkové roztažnosti α ($\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$) tzv. tepelné roztažnosti.

Pro tepelně namáhané litinové odlitky je nutné počítat se zvýšenou úrovní vnitřních pnutí, vznikající v důsledku změn teplot a teplotních gradientů při jejich provozu. Úroveň vnitřní napjatosti je závislá především na teplotě a fyzikálních vlastnostech použitých litin jako jsou teplotní součinitel délkové roztažnosti α ($\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$) a modul pružnosti v tahu E (GPa).

¹ Ing. Jiří Hampl, PhD. – Katedra slévárenství, FMMI, VŠB-TU Ostrava

² Ing. Petr Kozelský, CSC. – Katedra slévárenství, FMMI, VŠB-TU Ostrava

Teplotní součinitel délkové roztažnosti α ($\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

Na teplotním součiniteli délkové roztažnosti α závisí velikost pnutí při změnách teploty, čím je jeho hodnota vyšší, tím více se zvyšuje úroveň napjatosti a snižuje rozměrová stabilita odlitků. Součinitel teplotní roztažnosti α je závislý na teplotě, jeho hodnota se s rostoucí teplotou zvyšuje. Hodnoty α ($\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$) jsou pro nelegované LLG dle EN-1561 pro EN-GJL-150 až 350 v tabulkách [3] uváděny se stejnými hodnotami pro všechny typy LLG. Pro rozsah teplot -100°C až 20°C je $\alpha = 10$; pro $20 - 200^\circ\text{C}$ je $\alpha = 11,7$; $20 - 400^\circ\text{C}$ je $\alpha = 13,0$ ($\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$). V tab.1 jsou uvedeny hodnoty α pro strukturní složky litin[4].

Tab.1 Teplotní součinitele délkové roztažnosti α ($\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$) pro strukturní složky litin.

Strukturní složka	ferit	austenit	cementit	grafit	perlit
α (ppm/ $^\circ\text{C}$)	12,5	18,0 – 20,0	6,0 – 6,5	7,5 – 8,0	11,6

Při tuhnutí a tepelném namáhání odlitků vznikají tato pnutí:

tepelná - dočasná a zbytková (trvalá) vznikající rozdílností teplot mezi povrchem a vnitřkem odlitku během jeho tuhnutí a při ohřevu nebo ochlazování. Napětí dočasná lze odstranit, stárnutím nebo rychleji žháním, zbytková pnutí v odlitcích zůstávají a jsou zvláště nebezpečná z hlediska jejich dalšího provozu

fázová (transformační) – při přeměnách fází tvořících strukturu materiálu. Napětí způsobená odlišnými vlastnostmi jednotlivých fází a průběhem těchto změn v odlitku od povrchu k jeho tepelné ose. Při vratných přeměnách lze tento jev popsat přeměnou, ke které dochází při ochlazování austenitu. Přeměna probíhá schematicky: $\gamma \rightarrow \alpha$ při teplotě 721°C , kdy vznikající ferit má větší měrný objem (kubická mřížka prostorově centrovaná) než austenit s mřížkou kubickou plošně centrovanou, k opačné reakci dochází při ohřevu ($\alpha \rightarrow \gamma$).

smršťovací deformace odlitku vznikající odporem formy a jader proti smršťování, závisí hlavně na tvaru odlitku, na pevnosti a rozpadavosti formy a jader. Toto pnutí může způsobit deformaci odlitku a zmenšuje jeho výsledné celkové smrštění.

Tepelná zbytková pnutí mají největší vliv na deformaci odlitku, případně jeho porušení a jejich velikost narůstá v průběhu chladnutí. Ze základního vztahu (1)

$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot \Delta t \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

σ tahové (+) nebo tlakové (-) napětí	(MPa)
α součinitel tepelné roztažnosti	($\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
E modul pružnosti	(MPa)
Δt rozdíl teplot (teplotní gradient)	($^\circ\text{C}$)

vyplývá souhrnný vliv působení hodnoty součinitele tepelné roztažnosti α , jako materiálové konstanty, modulu pružnosti E daného materiálu a rozsahu teplotního gradientu Δt na velikost napětí σ . Zejména u tepelně namáhaných odlitků má hodnota α velký význam, protože čím je vyšší, tím větší vzniká v odlitku pnutí, které může způsobit jeho deformaci, porušení nebo vyřazení součástí z provozu [1,2].

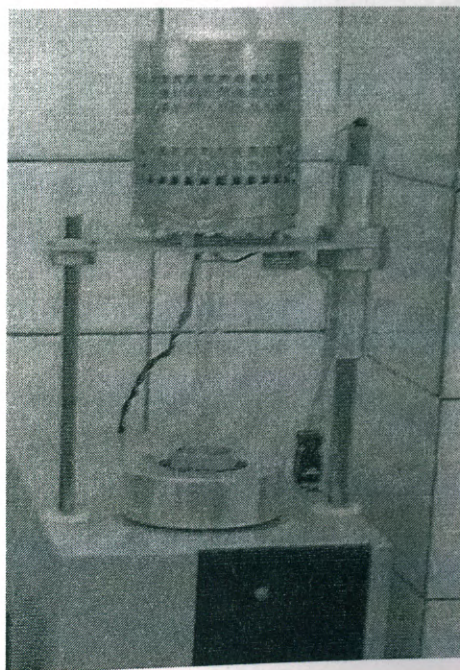
Experimentální tavby a měření teplotního součinitele délkové roztažnosti.

Pro porovnání vlivu chemického složení, vyjádřeném stupněm eutektičnosti S_c a mikrostruktury na velikost teplotního součinitele délkové roztažnosti α různých jakostí litiny s lupínkovým grafitem bylo odlito 8 taveb (4 tavby s dvěmi podtavbami). Stupeň eutektičnosti S_c byl ve druhé podtavbě vždy zvýšen přidáním Si a nauhličením. Tavby byly provedeny na středofrekvenční indukční peci obsahu 40 kg s neutrální vyzdívkou[5].

Z každé tavby byly odlity 4 zkušební tyče(tavby I-1 jen 2ks a I-2 jen 3ks) s průměry Ø 30 mm, Ø 25 mm, Ø 20 mm a Ø 15mm ze kterých byly vyrobeny vzorky pro zkoušky meze pevnosti v tahu R_m . Z přetržených tyčí byly vysoustruženy vzorky Ø 4 x 10 mm pro měření koeficientu α při teplotách 200 a 400 °C na termomechanickém analyzátoru TMA CX 03 R obr.1. Přehled jakostí litin podle chemického složení a mikrostruktur zjištěných na tyči Ø 30 mm jsou v tabulce 1. Ostatní zjištěné hodnoty meze pevnosti v tahu R_m , koeficientu α a Ø tyče ze které byl vyroben vzorek pro termomechanické zkoušky jsou v tabulkách 2 až 9. Grafické znázornění výsledků měření koeficientu α při teplotách 200 a 400 °C jsou na obrázcích 2 až 9.

Tab.1 Chemické složení a mikrostruktura taveb I-IV

Tav.	C(%)	Mn(%)	S(%)i	P(%)	S(%)	Cr(%)	Mo(%)	S _C	grafit	P,F,Cp
I-1	3,022	0,639	1,45	0,055	0,066	0,16	0,017	0,80	ID5	Cp40
I-2	3,404	0,649	1,82	0,052	0,075	0,156	0,013	0,93	IE7	P100
II-1	3,00	0,616	1,81	0,058	0,067	0,16	0,014	0,81	ID4	P100
II-2	3,375	0,624	2,09	0,057	0,076	0,161	0,011	0,94	IC3	P100
III-1	3,422	0,643	1,92	0,057	0,066	0,163	0,014	0,94	IC5	P100
III-2	3,494	0,644	2,52	0,054	0,087	0,159	0,008	1,01	IC5	P80
IV-1	3,294	0,617	1,91	0,059	0,071	0,483	0,311	0,90	IC4	P100
IV-2	3,505	0,618	2,78	0,059	0,069	0,462	0,308	1,04	IC3	P100

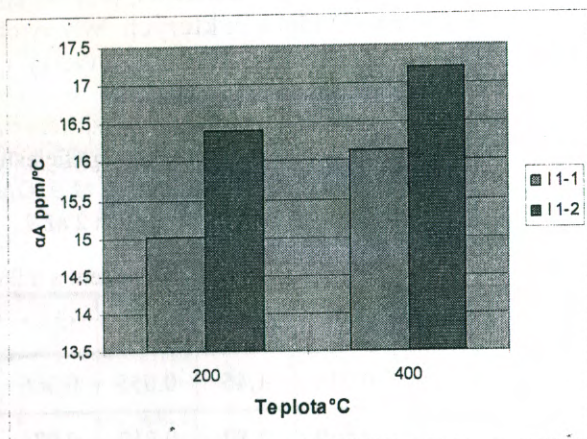


Obr.1 Termomechanický analyzátor TMA CX 03 R

Tab.2 Tavba I-1, Ø tyče, R_m , α

Č.vz.	Ø tyče (mm)	R_m (MPa)	α ($\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	
			200°C	400°C
I 1-1	30	327	15,02	16,14
I 1-2	25	250	16,41	17,21
průměr		289	15,71	16,68

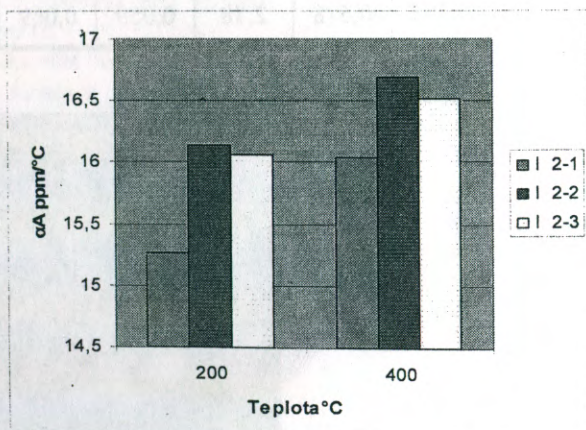
Obr.2 Tavba I-1, α ($\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$) při teplotě 200 a 400°C



Tab.3 Tavba I-2, Ø tyče, R_m , α

Č.vz.	Ø tyče (mm)	R_m (MPa)	α ($\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	
			200°C	400°C
I 2-1	30	300	15,26	16,04
I 2-2	25	280	16,14	16,69
I 2-3	20	248	16,06	16,51
průměr		276	15,82	16,41
$\Delta\alpha$ (%) I/2 - I/1			0,07	- 1,61

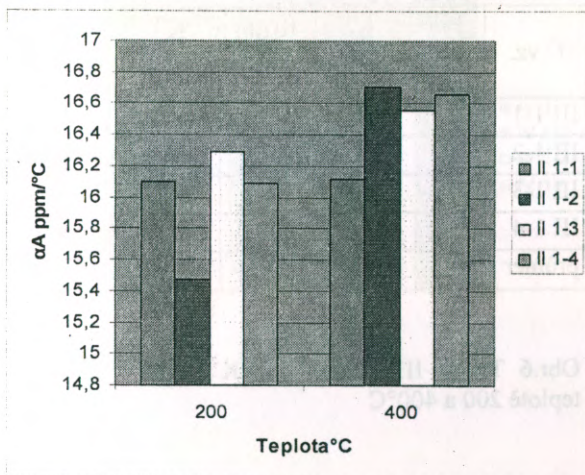
Obr.3 Tavba I-2, α ($\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$) při teplotě 200 a 400°C



Tab.4 Tavba II-1, Ø tyče, R_m , α

Č.vz.	Ø tyče (mm)	R_m (MPa)	α ($\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	
			200°C	400°C
II 1-1	30	321	16,10	16,12
II 1-2	25	341	15,47	16,71
II 1-3	20	323	16,29	16,56
II 1-4	15	354	16,09	16,66
průměr		335	15,99	16,51

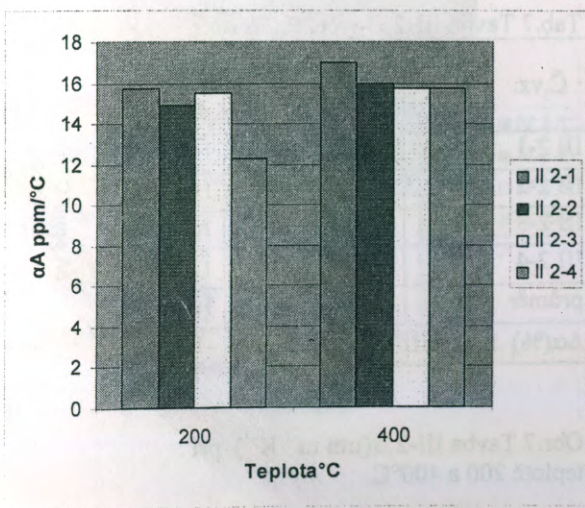
Obr.4 Tavba II-1, α ($\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$) při teplotě 200 a 400°C



Tab.5 Tavba II-2, Ø tyče, R_m , α

Č.vz.	Ø tyče (mm)	R_m (MPa)	α ($\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	
			200°C	400°C
II 2-1	30	270	15,73	16,99
II 2-2	25	315	14,92	16,94
II 2-3	20	354	15,52	16,77
II 2-4	15	370	(12,26)	16,72
průměr		327	15,39	16,11
$\Delta\alpha(\%)$ II/2 - II/1			- 3,75	- 2,42

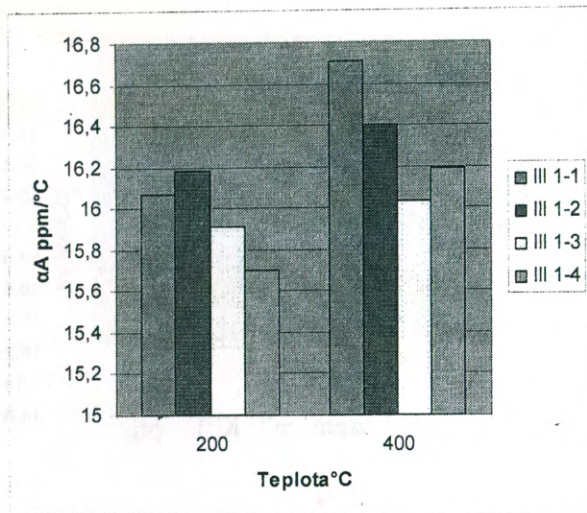
Obr.5 Tavba II-2, α ($\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$) při teplotě 200 a 400°C



Tab.6 Tavba III-1, Ø tyče, R_m , α

Č.vz.	Ø tyče (mm)	R_m (MPa)	α ($\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	
			200°C	400°C
III 1-1	30	273	16,07	16,71
III 1-2	25	303	16,18	16,4
III 1-3	20	317	15,91	16,03
III 1-4	15	369	15,7	16,19
průměr		315	15,97	16,33

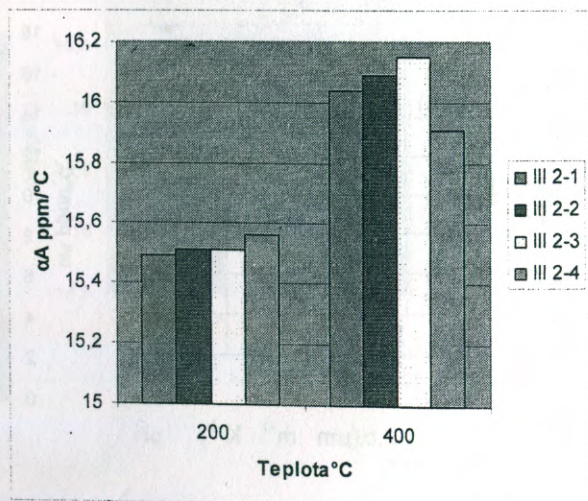
Obr.6 Tavba III-1, α ($\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$) při teplotě 200 a 400°C



Tab.7 Tavba III-2, Ø tyče, R_m , α

Č.vz.	Ø tyče (mm)	R_m (MPa)	α ($\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	
			200°C	400°C
III 2-1	30	177	15,49	16,04
III 2-2	25	192	15,51	16,09
III 2-3	20	231	15,51	16,15
III 2-4	15	267	15,56	15,91
průměr		216	15,52	16,05
$\Delta\alpha(\%)$ III/2 - III/1			-2,82	-1,71

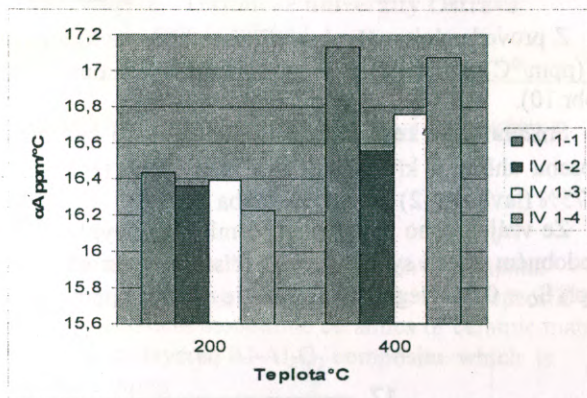
Obr.7 Tavba III-2, α ($\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$) při teplotě 200 a 400°C



Tab.8 Tavba IV-1, Ø tyče, R_m , α

Č.vz.	Ø tyče (mm)	R_m (MPa)	$\alpha(\mu m\ m^{-1}\ K^{-1})$	
			200°C	400°C
IV 1-1	30	350	16,44	17,13
IV 1-2	25	365	16,36	16,56
IV 1-3	20	385	16,4	16,76
IV 1-4	15	449	16,23	17,07
průměr		386	16,36	16,88

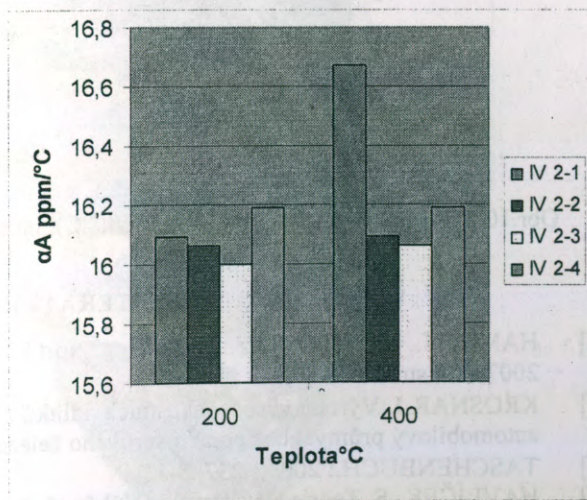
Obr.8 Tavba IV-1, $\alpha(\mu m\ m^{-1}\ K^{-1})$ při teplotě 200 a 400°C



Tab.9 Tavba IV-2, Ø tyče, R_m , α

Č.vz.	Ø tyče (mm)	R_m (MPa)	$\alpha(\mu m\ m^{-1}\ K^{-1})$	
			200°C	400°C
IV 2-1	30	175	16,09	16,67
IV 2-2	25	185	16,06	16,09
IV 2-3	20	198	16,00	16,06
IV 2-4	15	276	16,19	16,19
průměr		208	16,09	16,25
$\Delta\alpha(\%)$ VI/2 - VI/1			-1,65	-3,73

Obr.9 Tavba IV-2, $\alpha(\mu m\ m^{-1}\ K^{-1})$ při teplotě 200 a 400°C

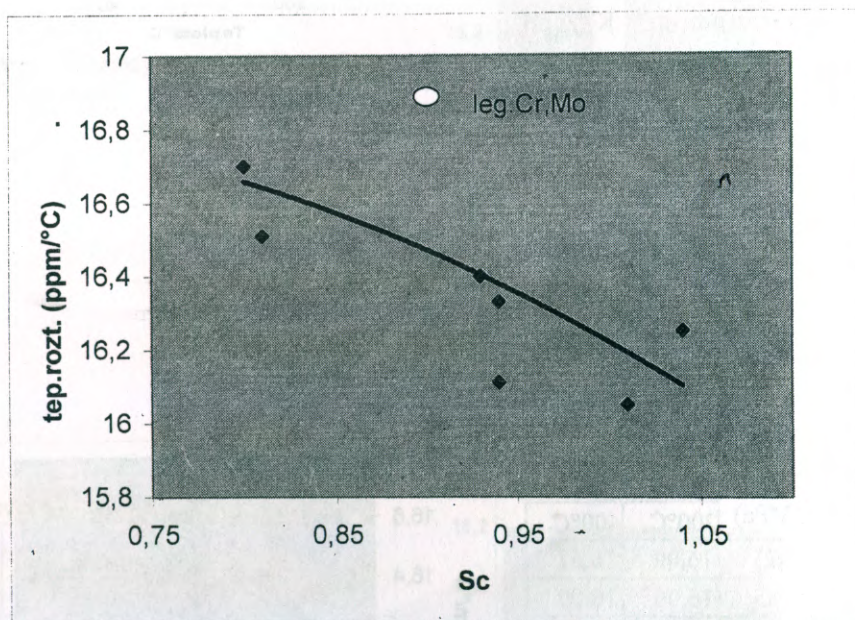


ZÁVĚR

Z provedených měření vyplývá, že hodnota koeficientu teplotního součinitele délkové roztažnosti α (ppm/°C) se snižuje se zvyšujícím se stupněm eutektičnosti S_C litiny s lupínkovým grafitem (obr.10).

Snížení α při teplotě měření 400 °C bylo zjištěno u každé podtavby jako důsledek zvýšeného obsahu uhlíku a křemíku, pokles koeficientu teplotního součinitele délkové roztažnosti je rozsahu 3,75% (tavba IV-2) do 1,61% (tavba I-2).

Ze vzájemného porovnání osmi taveb vyplývá, že teplotní součinitel délkové roztažnosti se při podobném stupni syčení zvýšil přísadou legur až o 6,8%, tak že při $S_C = 0,93$ je $\alpha = 16,04$ ppm/°C a při $S_C = 0,90$ s legurami Cr, Mo je $\alpha = 17,13$ ppm/°C.



Obr.10 Vliv stupně eutektičnosti na α (ppm/°C), jeden bod je průměrná hodnota ze 4 měření.

LITERATURA:

- [1] HAMPL, J., VONDRÁK, V.: Technologičnost konstrukce litinových odlitků, Slévárství, 2007, č. 4 str. 165 – 169
- [2] KROSAR, J.: Výroba vysoce jakostních odlitků z litiny s lupínkovým grafitem pro automobilový průmysl bez použití surového železa, Slévárství 2-3, 2006, s. 59-64
- [3] TASCHENBUCH.: 2003, s. 237-241
- [4] HAVLÍČEK, F. Teorie slévárství (Výběr přednášek), VŠB-TUO, Ostrava 1992
- [5] ŠRYTR, J.: Vliv změny struktury na materiálové charakteristiky litin, diplomová práce, VŠB-TU Ostrava, 2007

Poděkování: Příspěvek vznikl v rámci řešení projektu GAČR 106/05/0446 „Reoxidační procesy při odlévání slitin železa.“